

Gymnasium
Michelstadt

Martin Dächert



[DAS ELEKTROMOBIL]

Öko-Energetische Betrachtungen / Eigene Versuche

Die große Hoffnung im Kampf gegen den Klimawandel. Einige Entwicklungsaspekte werden anhand von veröffentlichten Daten und eigener Versuche kritisch eingesehen

Inhalt

1. Einleitung
2. Stand der Entwicklung
 - 2.1. Allgemeine Lage
 - 2.2. Die Kosten
 - 2.3. Nachhaltigkeitsbilanz
3. Ausgewählte technische Probleme
 - 3.1. Der Energiefluss (Analyse)
 - 3.2. Eigene Versuche und Ideen zum elektrischen Antrieb
 - 3.2.1. Die Störungen
 - 3.2.2. Besser als Siemens?
 - 3.2.3. Der Motor an der Brücke
4. Vorläufige Zusammenfassung
5. Literatur
6. Danksagungen

1 Einleitung

Alle Energieflüsse haben ein gemeinsames Schicksal – sie münden in den Ozean namens „mikroskopisches Chaos“, enden also als minderwertige Wärmeenergie. Dies besagt der zweite Satz der Thermodynamik. Wenn nicht gerade die Wärme selbst erwünscht ist, hat der Mensch seit jeher versucht, den Energieflüssen auf diesem Weg ins Chaos bestimmte Anteile anderer, sehr nützlicher Energieformen abzugewinnen, wie z.B. die chemische Energie (Photosynthese), elektrische Energie (Solarzellen), mechanische Energie (Windmühlen, Segelschiffe, Verbrennungsmotoren).

Allerdings sind dabei jeweils mehrere, teilweise widersprüchliche Faktoren wirksam, und jede Art Energieumwandler stellt letzten Endes einen Kompromiss zwischen unterschiedlichen Anforderungen dar. Verständlich ist das Bestreben nach möglichst verlässlichen, kompakten, zeitlich flexiblen Energieumwandlern, die evtl. auch noch zur Leistungsanpassung fähig sind. Der Grund dafür liegt wohl darin, dass dadurch Raum, menschliche Arbeitszeit und Herstellungskosten für diese Wandler gespart werden können – alles wertvolle Ressourcen. Ein weiterer wichtiger Faktor sind die Kosten der primären Energiequellen, die den eigentlichen Energiefluss erst in Gang setzen. Möglichst billige, frei verfügbare und konzentrierte Quellen sind erwünscht!

Dieser Sachverhalt äußert sich auch besonders in der Entwicklung der Verkehrsmittel. Beschränkt man sich auf das Festland, so sind erst mit der Entwicklung der Eisenbahn und der Kraftfahrzeuge wirklich effektive Verkehrs- und Transportmittel entstanden. Möglich wurde dies durch die Entwicklung von (relativ) effektiven Verbrennungsmotoren. Diese verwenden meist kompakten Brennstoff aus fossilen Quellen. Günstig war auch, dass die energetischen Abfälle (minderwertige Wärme) unbedenklich waren, während die materiellen Abfälle (CO₂) problemlos von der Pflanzenwelt aufgearbeitet werden konnten.

Diese Assimilation von Kohlenstoffdioxid ist erst durch die Skalierung dieser Art der Energieumwandlung zum Problem geworden. Immer stärker anwachsende CO₂-Emission überfordert die Fähigkeiten der Pflanzenwelt zur Assimilation, die durch Raubbau und immer größeren Flächenbedarf der Menschheit dezimiert werden. Der unmittelbarste Nebeneffekt ist die Aufwärmung der Atmosphäre, mit vielen unerwünschten Folgen. Aus dieser Problematik erwächst das Bestreben, die CO₂-Emission zu verringern.

Dies betrifft namentlich die Autos, die z.B. in den USA für ca. 40% der CO₂-Emission verantwortlich sind. Es werden zur Zeit mehrere Möglichkeiten dafür erprobt, denen jedoch praktisch immer ein Problem gegenübersteht: Große Erwartungen setzt man auf den Antrieb mit elektrischer Energie (manchmal auch in Kombination mit konventionellen Antrieben).

Diese Art Verkehrsmittel werden gewöhnlich – im Unterschied zum konventionellen Automobil – als Elektromobil, als Elektroauto oder kurz als E-Mobil/E-Auto bezeichnet. In dieser Ausarbeitung sollen Hintergründe, bestimmte Besonderheiten des energetischen Haushalts eines E-Mobils, markante Konstruktionsmerkmale, sowie ausgewählte aktuelle Probleme in der Entwicklung behandelt werden. Hierbei stütze ich mich auf derzeitige Erkenntnisse aus Literatur und Medien, aber auch auf eigene Versuche, die ich zu einigen Problemen im angesprochenen Themenbereich angestellt habe.

2 Der Stand der Entwicklung

2.1 Allgemeine Lage

Fakt ist, dass der große Teil der derzeitigen E-Mobile entweder Prototypen oder teure, für den Massenmarkt ungeeignete Spezialautos sind. Ein anderer Teil hingegen befindet sich bereits oder noch in der Testphase [1].

Hier kann man ein großangelegtes Pilotprojekt wie z.B. den Mini-E anführen. Dieser wird zur Zeit in Kalifornien, New York, New Jersey und seit 2009 auch in Berlin getestet. In der Schweiz und Italien hingegen wurden diverse Fahrzeuge der Schweizer Firma MES-DEA („Divisione Energie Alternative“) erfolgreich zur Kleinserie geführt. Dies gelang durch intensive Forschungs- und Entwicklungsarbeit seit den 1980er Jahren.

Als alltagstauglich gilt derzeit auch der Subaru R1e. Dieser wurde von Subaru zusammen mit der Tokyo Electric Power Company (TEPCO) in einer großen Reihe Feldversuche entwickelt. Nun wurden bereits im Sommer 2009 die ersten 100 Exemplare zu Testzwecken an japanische Kunden ausgeliefert. Interessante Projekte laufen zur Zeit bei Mercedes-Benz [2].

Natürlich müssen bei diesen Projekten auch Stromversorger Interesse zeigen und einsteigen: E-Mobile brauchen Stromtankstellen, wenn ihnen unterwegs der Strom ausgehen sollte. Hier haben Siemens und RWE ein Pilotprojekt gestartet: An 40 Standorten in Deutschland sollen Ladestationen eingerichtet werden. Die erste Autostrom-Tankstelle steht nun in Frankfurt [3].

Die Serienreife haben aber diese E-Mobile noch nicht erreicht. Das ehrgeizige Konzept der Bundesregierung stößt auf Kritik. Diese kommt einerseits aus Forschung und Industrie, die das Elektromobil noch weiterentwickeln wollen, da die derzeitige Technik noch nicht marktreif sei. Andererseits kritisieren Umweltschutzgruppen das E-Mobil als Lösung. Sie befürchten, dass die Elektroautos nur eine Verlagerung der Umweltverschmutzung bedeuten: Was die E-Mobile nun an Strom bräuchten, würde in Atomkraftwerken und Kohlekraftwerken produziert und weiter die Umwelt verschmutzen. Weniger CO₂-Emission gäbe es nur, wenn die Elektroautos mit reinem Ökostrom betankt würden. Dies scheint aber nicht möglich: Denn selbst wenn der Ökostromanteil in unseren Netzen, wie (optimistisch) prognostiziert, bis 2020 auf 47% steigt, würden die 1 Millionen Elektroautos immer noch zu knapp 50% mit Strom aus fossilen Brennstoffquellen gespeist (s.u.)

2.2 Die Kosten

Die hohen Kosten des E-Mobils, wie nachfolgend gezeigt werden soll, sind im wesentlichen durch die Verwendung von Akkumulatoren, sowie durch einige Konsequenzen davon, verursacht. Zur Zeit setzt man in der Elektromobiltechnik besonders leistungsfähige Lithium-Ionen Akkus (kurz: Li-Ion Akku) ein, vgl. z.B. [4]. Ein solcher Akku wiegt bei Speicherkapazität von 10 kWh (dies entspricht dem Energiegehalt von 1 Liter Benzin) zusammen mit erforderlichen Komponenten ca. 100 kg. Je nach Fahrzeuggröße beträgt die Reichweite eines solchen Akkus 50 bis 100 km. Die Akkus, die eine Reichweite von bis zu 200 km ermöglichen, verursachen derzeit Mehrkosten von 30.000 € und wiegen mehr als 350 kg. Außerdem haben diese Akkus nur eine Lebenserwartung von 1000 Ladezyklen. Bei einer Reichweite von 50 bis 200 km pro Ladung bedeutet dies eine Maximalreichweite von 50.000 bis 200.000 km. Dieser hohe Verschleiß macht den regelmäßigen Austausch der Akkus notwendig und erhöht damit die Kosten.

Eine Schätzung zeigt, dass eine einzige Akkuladung 20 € Verschleißkosten verursacht. Selbst wenn die Akkutechnik rasante Fortschritte machen würde, oder die Akkus dank Massenproduktion immens billiger würden und die Kosten so um den Faktor 4 (d.h. um 75%) verringert werden könnten, so würde jede Ladung dennoch 5 € teuer sein. Dieser Akkuverschleiß ist auch Grund für die vergleichsweise hohen Fahrtkosten. Der derzeitige Strompreis liegt im Schnitt bei 0,2 € je kWh. Bei 20 kWh Ladekapazität eines Elektromobils kostet der Strom also 4 € für 100km Fahrt. Wenn man nun den optimistischen Wert von 5 € für den Akkuverschleiß dazurechnet, so erhält man einen Wert von 4 € + 5 € = 9 € für 100km

Fahrt. Dieser Wert von 9 €/100km liegt nur unwesentlich unter dem eines Benzinautos (7 l/100km bei 1.30 €/l = 9.1 €/100km).

Nun wurden aber noch keinerlei Steuern miteinbezogen. Da dem Staat dann die Einnahmen aus der Mineralölsteuer fehlen, müsste der Fahrstrom besteuert werden. Dies geht aber keineswegs wie mit der Mineralölsteuer: 0,65 € pro Liter Benzin an den Staat. Wenn man ein Elektromobil nach diesem Prinzip besteuern würde, so würde der Staat nur $2 \times 0,65 \text{ €} = 1,3 \text{ €}$ einnehmen, da 1 Liter Benzin 10 kWh Strom entsprechen. Selbst so würden 100 km Fahrt schon 10,3 € kosten. Wenn der Staat nun aufkommensneutral zur Mineralölsteuer besteuern würde, so würden 20 kWh 4,55 € kosten, da ein Benziner (7 l/100km) auch 4,55 € Steuer abwirft. Damit lägen die Fahrtkosten bei 13,55 €/100km. Realistisch betrachtet (d.h. 20 € Akkuverschleiß) lägen die Kosten sogar bei 28,55 €/100km. Wenn man also rein von Stromkosten und Steuer von 4,55 € ausgeht, müssten die Akkuverschleißkosten auf 0,45 € gesenkt werden. Derartige Verbesserungen in der Akkutechnik sind bis 2020 wirklich nicht zu erwarten.

Aber selbst dann sind die Anschaffungskosten hoch. Hier wollen die Staaten unter die Arme greifen, indem sie Elektromobile subventionieren. Ein gutes Beispiel dafür ist der iMiev von Mitsubishi, der von der japanischen Regierung mit ganzen 11.000 € subventioniert werden soll (Preis des iMiev: 34.000 € [5]).

Um diese Rechnung nochmals zu verdeutlichen, wurden die Daten zum besseren Überblick nochmals in einer Tabelle zusammengefasst [3].

	Benzinauto (7L/100km)	Elektromobil (20kWh-Akku)
Fahrtkosten durch Verschleiß	unbekannt	20€ pro 100km
Steuer für Kraftstoff	7x 0,65€ pro 100km (4,55€)	2x 0,65€ pro 100km (1,3€)
		Anpassung auf 4,55€:
		2x 2,275€ pro 100km
Kosten für Kraftstoff	7x 1,30€ (9,1€)	20x 0,2€ (4€)
Gesamtkosten	9,1€ pro 100km	28,55€ pro 100km

2.3 Nachhaltigkeitsbilanz

Der Elektromotor ist als Wandler elektrischer Energie ungeschlagen: Es wurden bereits Elektromotoren gebaut, deren Wirkungsgrad bei annähernd 99% liegt. Diese finden ihre Anwendung derzeit aber nur im Modellbau, könnten aber auch in Zukunft den Antrieb eines E-Mobils bilden. Die derzeitigen Motoren der Elektromobile liegen mit ihrem Wirkungsgrad knapp über 80%.

Nun ist aber die Frage, wie viel CO₂ solch ein Elektromobil denn im Vergleich zu einem normalen Auto einspart. Auf den ersten Blick wären das ja 100%, da ein E-Mobil nur mit Strom läuft. Dieser Strom muss aber zunächst erzeugt werden. Bei 20 kWh/100km (=2 Liter Benzin) verbraucht ein E-Mobil also 0.2kWh/km, was bei der „Betankung“ mit deutschem Strommix einen CO₂-Ausstoß von 120g/km entspricht. Hinzu kommen die Treibhausgase, die durch den Akku-Verschleiß entstehen: 48 g/km (laut Ökobilanz von Rolf Frischknecht). Demnach käme das E-Mobil auf einen Gesamt-CO₂-Ausstoß von 168 g/km. Dies entspräche einem herkömmlichen Auto. Selbst wenn man den Ökostrom-Anteil auf 47% erhöhen und den Akkuverschleiß halbieren könnte, käme das E-Mobil auf einen Wert von 84 g/km CO₂ {24 g/km + 60 g/km} Diese CO₂-Emissionswerte erreicht auch ein optimierter Benzin- oder Diesel-PKW.

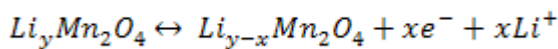
Die obigen Rechnungen zeigen, dass die Elektromobile nur CO₂-ärmer als Benzin- oder Dieselaautos sind, sobald die E-Mobile mit reinem Ökostrom betrieben werden. Da auch

dieser nicht CO₂-neutral ist, entstehen selbst bei reiner Windkraftversorgung der E-Mobile noch 52,6 g/km CO₂. Überdies sollte man auch die Menge der Elektromobile nicht überschätzen: So stehen 1 Million Elektromobile gegen 50 Millionen herkömmliche Benzin- und Dieselautos. Die Elektromobile machen also nur 2% des Fahrzeugbestandes in Deutschland aus. Nicht mitgerechnet sind dabei noch ein immer weiter steigender LKW-Anteil sowie diverse Zweiräder.

3 Ausgewählte technische Probleme

3.1 Der Energiefluss (Analyse)

Die elektrische Energie ruft im Akkumulator des Elektromobils beim Aufladen eine elektrochemische Reaktion hervor:



Dabei entstehen die Lithium-Mangan-Oxide Li₂Mn₂O₄; der elektrische Strom wird nun als chemische Energie im Akku gespeichert. Wenn nun Strom entnommen wird, so wird diese Reaktion rückläufig, es werden aus dem Lithium-Mangan-Oxid Elektronen und die namensgebenden Lithium-Ionen freigesetzt. Es „entsteht“ Strom. Dies ist der Lade- bzw. Entlade-Vorgang des Akkus. Die dem Li-Ionen Akku zugeführte Energie bleibt überdies sehr lang bestehen: Ein durchschnittlicher Li-Ionen Akku entlädt sich (ohne Gebrauch) um ca. 1% pro Monat.

Der Strom aus dem Akku erzeugt im Elektromotor auf bestimmte Weise ein Magnetfeld, welches den Motor zum Drehen bringt. Allerdings gibt es im Auto weitere elektrische Verbraucher wie Heizung, Radio, Scheinwerfer usw., die alle noch Strom verbrauchen und so an der verfügbaren Energiemenge zehren. Sie beeinflussen die Reichweite des E-Mobils also maßgeblich. Fasst man diese Energiemenge unter W_V zusammen, so bleibt von der gesamten gespeicherten Energie folgender Betrag für die Bewegung übrig:

$$W = (W_{\text{gesamt}} - W_V) \times \eta$$

Eine Abschätzung von W_V ist nicht leicht; ein pauschaler Wert von 10% erscheint plausibel. Bei einem Wirkungsgrad des Motors von 80% werden aber 20% der restlichen (90%) Energie nutzlos in die Wärme umgewandelt; der Motor hat demnach einen Wirkungsgrad von $\eta = 0,8$, das ganze System somit 0,72. Diese 72% der gespeicherten Energie werden in mechanische Fahr-Arbeit umgewandelt. Waren etwa im Akku 20 kWh gespeichert (entspricht 72 MJ), so sind dann noch immer 52 MJ „für die Bewegung“ verfügbar. Allerdings gibt es noch weitere Faktoren, die unmittelbar mit der Bewegung zusammenhängen und die den verfügbaren Energiebetrag zusätzlich verringern:

→ Bei der Bewegung auf unebener Fläche muss die Hangabtriebskraft überwunden werden. Dieser Energiebetrag kann normalerweise nicht wiedergewonnen werden, da er bei der nachfolgender Bewegung den Hang hinunter über das Bremsen „verheizt“ wird. Er wird durch die „Hangigkeit“ des Weges bestimmt; beim durchschnittlichen Basiswinkel der Hänge von α wird α noch, wie leicht zu sehen ist, mit dem Faktor $(1 - \sin \alpha)$ multipliziert. Z.B. ist bei $\alpha = 10^\circ$ dieser Faktor gleich 0,83, und von 52 MJ bleiben so 43 MJ.

→ Die Energie für die Beschleunigung des E-Mobils wird ja letzten Endes ebenfalls durch das Bremsen „vergeudet“. Der Betrag hängt davon ab, wie oft beschleunigt werden muss; in dem hier betrachteten Fall sind jeweils 112 kJ pro Beschleunigung von 0 auf 50 km/h nötig. Wenn etwa bei einem Gesamtweg von 150 km im städtischen Verkehr alle 500 m gebremst wird, sind es 33 MJ! Und dann bleiben nur noch 10 MJ übrig.

→ Ein gewisser Teil geht durch Rollreibung verloren. Zur Einschätzung werden folgende plausible Annahmen getroffen: 1. Der Reifenradius sei $r = 31\text{cm}$; 2. Die Masse des E-Mobils sei 1000kg; 3. Rollreibungszahl μ_{RR} betrage 0,002 cm (Reifen auf Asphalt). Die Rollreibungskraft berechnet sich wie folgt:

$F_{RR} = \mu_{RR} \times F_N / r = 0,63 \text{ N}$; für vier Räder somit 2,52 N. Der damit zusammenhängende Energiebetrag würde z.B. bei einer Strecke von 100 km 0,25 MJ betragen, ist also vernachlässigbar.

→ Außerdem muss auch bei der gleichförmigen Bewegung der Luftwiderstand überwunden werden. Diese „bremsende“ Kraft ist allerdings noch von der Geschwindigkeit und der Form des Autos abhängig: $F_L = \frac{1}{2} c_W A \rho v^2$, wobei c_W – der Luftwiderstandsbeiwert (Formfaktor), der bei günstiger Form des Autos ca. 0,3 beträgt; A – die Stirnfläche des Autos (zu $1,7 \text{ m}^2$ angenommen); $\rho = 1,29 \text{ kg / m}^3$ – die Luftdichte; v – Geschwindigkeit in m/s:

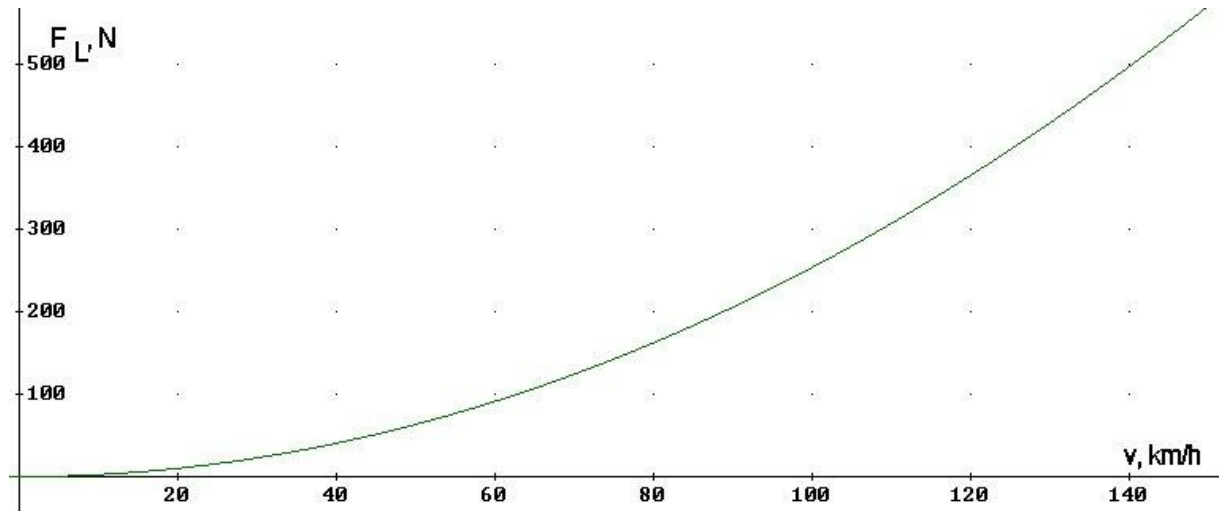


Abb. 1. Die Luftwiderstandskraft in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit

Gerade diese Kraft bewirkt, dass die Reichweite bei hohen Geschwindigkeit stark abnimmt (was übrigens auch für die üblichen Autos gilt); im unseren Modell ergibt sich Folgendes (Abb. 2).

Man kann feststellen dass sich ab 40 km/h nach dem betrachteten Modell plausible Werte ergeben, während bei kleiner Geschwindigkeit die Ergebnisse zu optimistisch erscheinen; offensichtlich wurden in dem Modell bestimmte Faktoren nicht erfasst oder richtig gewichtet.

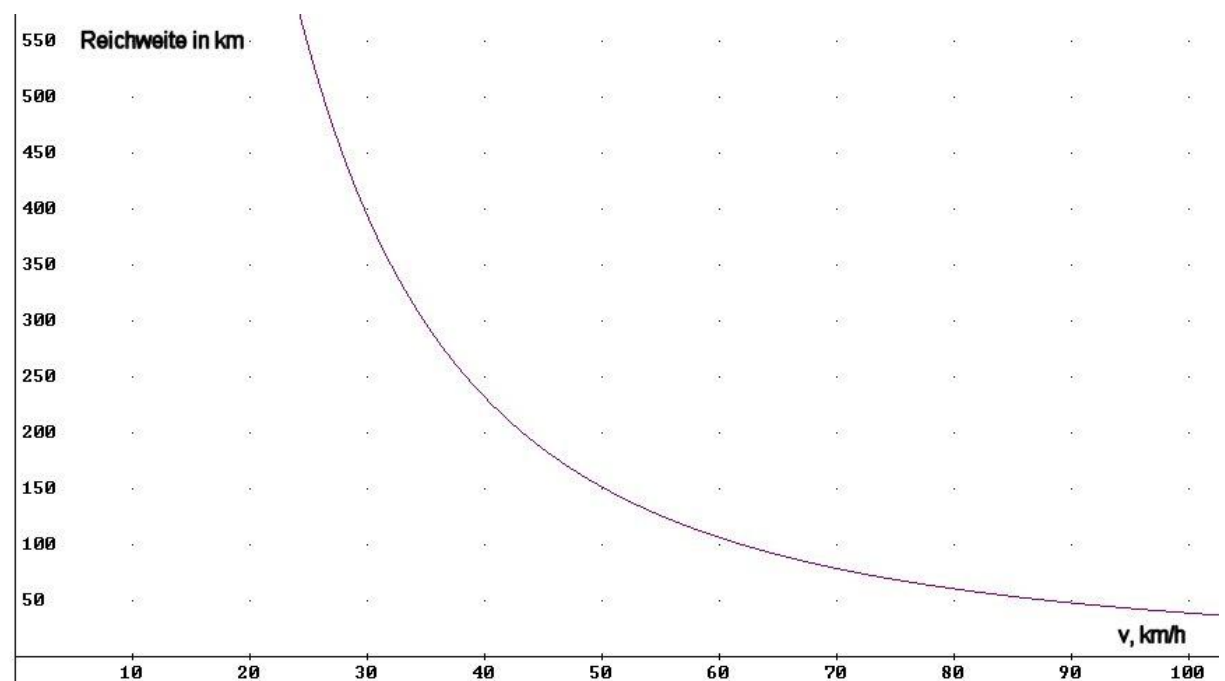


Abb. 2. Die Reichweite des E-Mobils in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit (vgl. Text).

Fazit: Für möglichst große Reichweite des E-Mobils ist eine kleine Geschwindigkeit zu empfehlen, was allerdings nicht immer praktikabel ist. Weitere technische Lösungen belaufen sich auf die Verringerung des Energieaufwandes durch:

- Sonstige Energieverbraucher, z.B. durch Verwendung von LED-Scheinwerfern usw.
- Beschleunigung – durch die Verringerung der Masse (leichte Karosserie usw.); durch die Verringerung der Fahrgeschwindigkeit; bessere Regelung des Verkehrs („grüne Welle“); Rückgewinnung der Energie durch „aktives“ Bremsen mit Elektromotoren.
- Rückgewinnung der Energie, die bei dem Fahren in die höheren Lagen aufgewandt wurde, - ebenfalls durch Bremsen mit den Elektromotoren.

In der Folge werden einige von meinen Versuchen aufgegriffen, die für die betrachteten Ansätze relevant sind.

3.2 Eigene Versuche und Ideen zum elektrischen Antrieb

Die Weitergabe der Leistung vom Motor an die Räder setzt in der Regel eine gewisse Anpassung des Motors an die „Effektoren“ voraus hinsichtlich der Drehzahl und des Drehmomentes, um den Besonderheiten der Bewegung Rechnung zu tragen. In den Autos übernimmt diese Funktion ein mechanisches Getriebe. Es hat aber bestimmte Nachteile, die eben durch seine mechanische Natur bedingt sind. Es beansprucht viel Raum, ist relativ massiv (was meistens zu Energieverlusten führt), unterliegt der mechanischen Reibung (bewirkt abermals Energieverluste und führt zum Verschleiß.)

Durch die Verwendung von Elektromotoren ergibt sich die Möglichkeit, die mechanische Leistung nicht etwa zentral zu „erzeugen“, sondern kleinere Elektromotoren evtl. für jedes Rad gesondert vorzusehen. Weitergeleitet und verteilt wird dabei nicht die mechanische, sondern die elektrische Energie, und die Zuteilung kann sehr fein mit elektronischen Mitteln erfolgen, ja durch die Verwendung von entspr. Sensoren und durch Regelwerke automatisiert werden.

Die Motoren sind ein wesentlicher Teil des elektrischen Antriebs. Eine grundlegende Unterteilung der Elektromotoren bezieht sich auf die verwendete Stromart: Wechselstrommotoren bzw. Gleichstrommotoren. Die ersteren sind derzeit wohl in Überzahl, schon weil der Wechselstrom mehr verbreitet ist. Für das Elektromobil sind hingegen Gleichstrommotoren von Interesse, weil ja die Energie in Form von Gleichstrom von dem Akkumulator bezogen wird.

Ich baue in unserer Elektronik-AG (Gymnasium Michelstadt) seit einiger Zeit Modellroboter und musste dabei feststellen, dass die Handhabung der in ihnen verwendeten Motoren doch beträchtlich das übersteigt, was wir sonst im „normalen“ Unterricht dazu erfahren haben. Einige Besonderheiten möchte ich nachfolgend darstellen, wobei ich mich vorerst auf Bürstenmotoren kleiner Leistung beschränken werde (vgl. auch [6]). Zu den Vorteilen der Bürsten-Gleichstrommotoren zählen das hohe Drehmoment; die durch die Spannung regulierbare Drehzahl sowie die Möglichkeit, durch die Änderung der Polung ohne weiteres die Drehrichtung zu umkehren. Darüber hinaus kann man diese Motoren auch zum Bremsen verwenden; dabei verwandelt sich die kinetische Energie des Vehikels nicht etwa in Wärme, sondern in elektrische Energie, und kann somit rückgespeichert werden.

3.2.1 Die Störungen

Aber zunächst soll hier auf die el. Störungen eingegangen werden, die durch das periodische Unterbrechen des Stromflusses am Kollektor des Bürsten-Motors verursacht werden. Je nach Art des Motors können sie für die ansteuernde Elektronik schädlich werden und auf jeden Fall deren normales Funktionieren beeinflussen. Die Messungen wurden mit einem kleinen Motor der Fa. BRAUN (9 Ω Widerstand, ca. 2 W maximal; hier ohne mechanische Belastung betrieben) durchgeführt, der in folgende Messschaltung eingebaut wurde:

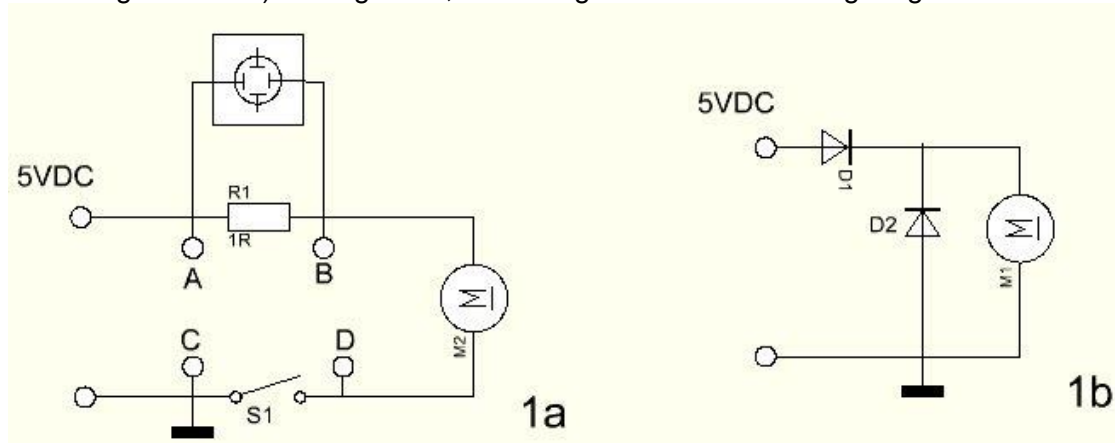


Abb. 3. Die el. Störungen an Bürstenmotoren: 1a) Die Versuchsschaltung; 1b) Realistische Beschaltung zur Unterdrückung der Störungen (s. Text).

An den Punkten A, B, C und D konnte man bei Bedarf verschiedene Bauteile (Kondensatoren usw.) anschließen, um ihre Auswirkung auf das Verhalten des Motors zu untersuchen.

Das Oszillogramm (Abb. 4a) zeigt Transienten am Messwiderstand mit einer Amplitude bis zu 0,5 V, was der vollen Spannung der Stromquelle entspricht, und zwar mit beiderlei Polung. Besonders interessant ist das abrupte Einsetzen der jeweiligen Schwingungssequenz im negativen Bereich. Dieser kurzzeitige negative Stromstoß (also zurück in die Stromquelle) kann auf den Induktionskick zurückgeführt werden, der beim Unterbrechen des Stromes am Kollektor auftritt (beträgt auch ca. 1/10 der Zyklusdauer). Aber auch die Stromaufnahme danach ist gar nicht trivial, sie besteht in einem Einschwingen, und bis zur nächsten Unterbrechung wird die volle mögliche Stromstärke gar nicht erreicht (hier am Messwiderstand müssten 0,5 V anfallen). Das Einschwingen wird wohl hauptsächlich durch die Eigenschaften des Rotors bedingt, andererseits zeigt die Abb. 2b, dass die Schwingungen auch durch einen Reihenwiderstand beträchtlich eingedämpft werden (allerdings die Leistung und der Wirkungsgrad ebenfalls).

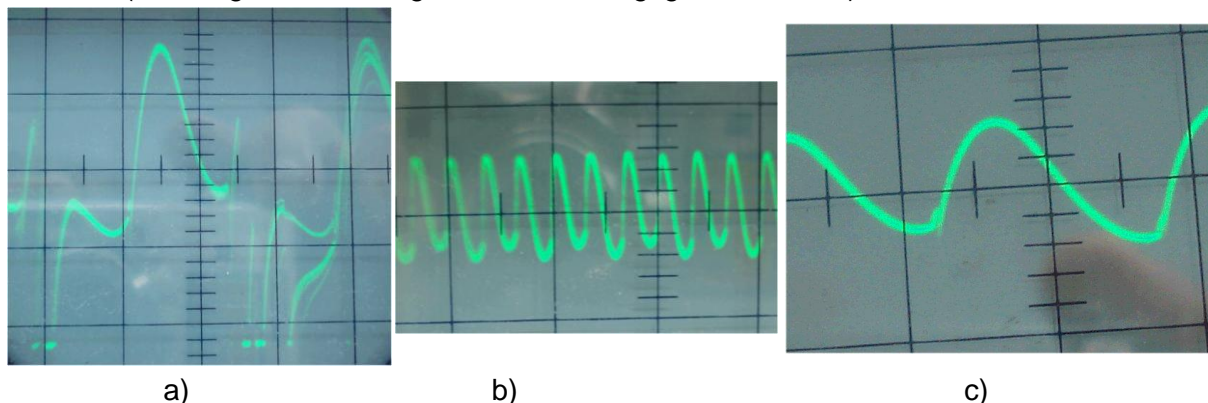


Abb. 4. Oszillogramme der Störungen, aufgenommen am Messwiderstand (1 \square) bei der Speisespannung 5V: a) Motor alleine (0,2 V/div, 0,5 ms/div) ; b) mit dem Widerstand von 27 \square in Reihe (10 mV/div, 10 ms/cm); c) mit der Diode in Reihe (0,5 V/div, 0,5 ms/div).

Der niedrige eigene Widerstand des Motors verhindert es auch, die Schwingungen effektiv mit einem Parallelkondensator zu unterbinden. Erst bei $C = 4700 \mu\text{F}$ hat sich die Amplitude der Schwingungen etwa halbiert (bei sonst gleicher Struktur). Solche Proportionen sind natürlich nicht hinnehmbar.

In [6] werden insbesondere Paralleldioden als eine effektive Maßnahme gegen die Störungen gepriesen. Jedoch sind die dort angeführten Diagramme gerade in dieser Hinsicht nicht überzeugend. Auch konnte ich in den eigenen Messungen keinen ausgeprägten Effekt feststellen. Eine krasse Abnahme der Schwingungsamplitude erfolgte aber, als eine Diode in Reihe zum Elektromotor geschaltet wurde (vgl. Abb. 2c). Dies lässt sich dadurch erklären, dass dadurch die induktiven Rückstöße schlicht unterbunden werden (eben durch die Diode), so dass schon die Anfangsamplitude der Schwingungen beschränkt ist. Und ein zusätzlicher Parallelkondensator hat wiederum nur einen marginalen Effekt gezeigt.

Somit erscheint als ein realistischer Kompromiss die Beschaltung nach Abb. 3b:

Die Diode D1 begrenzt hier die Schwingungen entsprechend der obigen Darstellung. Durch ihre Schwellenspannung frisst sie aber $0,7 \text{ V}$ von der Speisespannung weg, was also abgewogen werden muss. Auf jeden Fall erscheint aber die Verwendung von Kondensatoren als nicht sinnvoll. (Die Diode D2 schützt die evtl. in Reihe zum Motor geschalteten Halbleiter-Bauteile vor induktiven Spannungssprüngen.)

Fazit: Am Elektromotor selbst lassen sich die Störungen nicht effektiv bekämpfen. Somit empfiehlt es sich, eher die Steuerelektronik zu schützen.

3.3.2 Besser als Siemens?

Als Werner von Siemens die erste Straßenbahn im Jahre 1881 laufen ließ [7], war Vieles zum ersten Mal technisch zu lösen gewesen. Das war wohl eine interessante Angelegenheit. Besonders verblüfft hat mich die Tatsache, dass die Drehzahl der Motoren (also die Geschwindigkeit der Bahn) mit einem Schiebewiderstand geregelt wurde. Ja, und wie denn sonst? War man denn bei Gleichstrom nicht sowieso darauf angewiesen? (Bei großen Strömen wären die Leistungsverluste heutzutage unakzeptabel.)

Eine Alternative ist, dass die volle Spannung periodisch nur für kurze Zeit mit elektronischen Schaltern durchgeschaltet wird, sonst aber absolut abgeschaltet ist. Der Verbraucher bekommt so die volle Leistung nur für einen Bruchteil der gesamten Zeit, die (gemittelte) Leistung ist also ebenso nur ein Teil der vollen möglichen Leistung. Diese Leistungsportionen kann man größer oder kleiner machen, je nach Bedarf. Das erfreuliche ist dabei, dass die ganze Leistung entweder durch- oder abgeschaltet wird, der „Schalter“ also (im Idealfall) keine Energie in Wärme umwandelt und auch selbst nicht verbrennt. Weil dabei der Strom in Form von Impulsen bestimmter Länge durchgeschaltet wird, nennt man das Verfahren Pulsweitenmodulation (PWM).

Um diese Idee auszuprobieren, habe ich eine Probeschaltung aufgebaut (Abb. 3).

Hier ist der Timer NE555 als astabiler Multivibrator geschaltet [8]. Er erzeugt Impulse konstanter Frequenz (ca. 70 Hz), deren Tastverhältnis von der Lage des Potentiometers abhängt und hier von (fast) Null bis (fast) 100% kontinuierlich veränderbar ist. Diese Impulse steuern den MOSFET BUZ21 (vgl. [9]), den eigentlichen Leistungsschalter. Die Impulse werden dann dem Motor zugeführt, wobei zunächst noch ein Glättungskondensator an den Motor gelötet war; es hat sich jedoch gezeigt, dass dieser völlig überflüssig ist. Es sei noch vermerkt, dass nur ein n-Kanal MOSFET zur Verfügung stand, deswegen wird hier eigentlich die Masse zu- bzw. abgeschaltet, während der Motor an der $+5\text{V}$ -Schiene liegt.

Die Schaltung hat einwandfrei funktioniert. Die Drehzahl konnte man praktisch von Null (allerdings bei recht ruckartigem Drehen) bis zu sehr hohen Werten hin ändern.

Ich habe versucht, die Drehzahl mit dem Tastverhältnis in Verbindung zu bringen. Dazu hat ein kleines schwarzes Fähnchen gedient, das an der Motorachse befestigt war und bei jeder Umdrehung durch eine Lichtschranke lief. Leider war das Signal zu verrauscht als dass man die Oszillogramme quantitativ auswerten könnte. Zur Einsicht sind einige Oszillogramme in Abb. 6 angeführt.

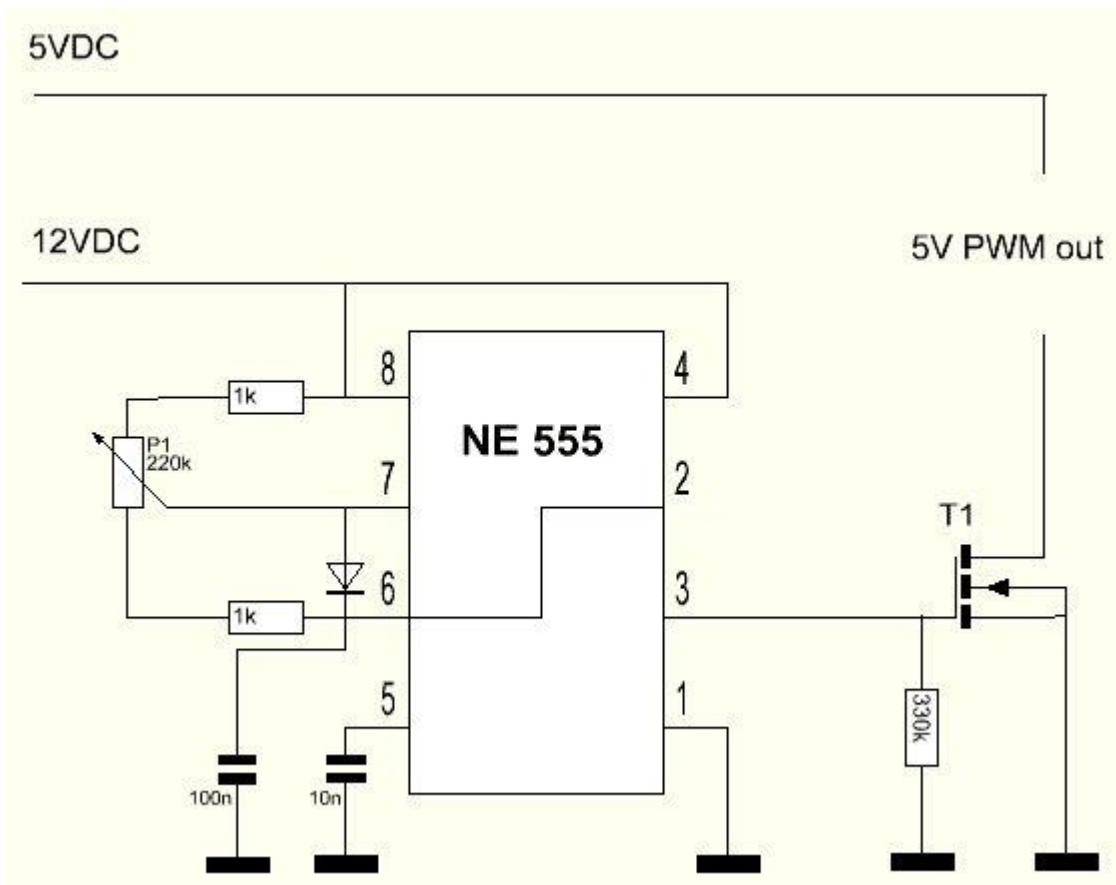


Abb. 5. Die Probeschaltung für die Untersuchung der Pulsweitenmodulation.

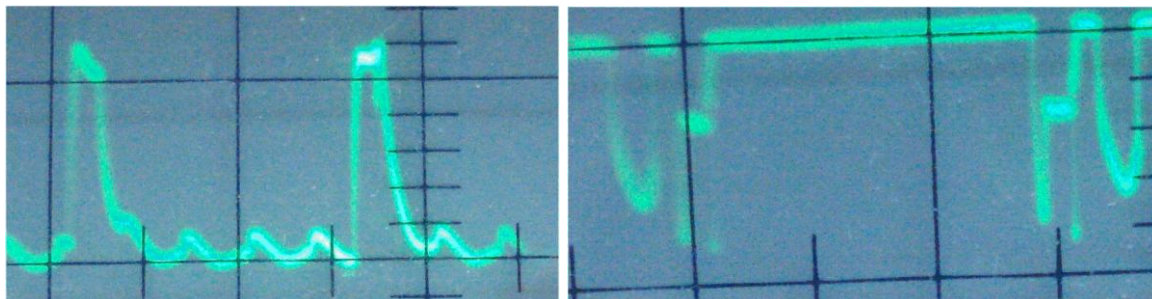


Abb. 6. Oszillogramme des Signals am Messwiderstand (1 \square , in Reihe mit dem Motor) bzw. an der Lichtschranke

Wesentlich ist hier, dass das Verfahren funktioniert, und zwar bleibt der MOSFET kalt. Wenn man bedenkt, dass BUZ21 bis 8A bei 100V schalten kann [5] und (samt Beschaltung) vielleicht hundertmal kleiner ist als ein entsprechender Schiebewiderstand, so wird klar, wie weit die Elektrotechnik seit der ersten Straßenbahn gekommen ist. Aber zu diesem Ergebnis hat eben das Wirken Werner von Siemens wohl beigetragen!

Fazit: Mit dem PWM-Verfahren lässt sich sehr effektiv die Leistung von Gleichstrommotoren regulieren und anpassen.

3.2.3 Der Motor an der Brücke

Man kann sich relativ leicht vorstellen, dass der Gleichstrommotor seine Drehrichtung ändert, sobald er andersherum gepolt wird. Aber wie diese Umpolung mit elektronischen Mitteln zu erreichen? Zur Zeit verwendet man dafür die sog. H-Brücke. In dieser Schaltung befindet sich der Motor quasi in der Mitte (Brücke) zwischen Seitenpfählen, die jeweils aus der Kombination von zwei Transistoren (pnp- und npn-) bestehen. Etwas modifizierte Schaltung dieser Brücke, die etwas resistenter zu den Störungen ist [10], wird hier angeführt.

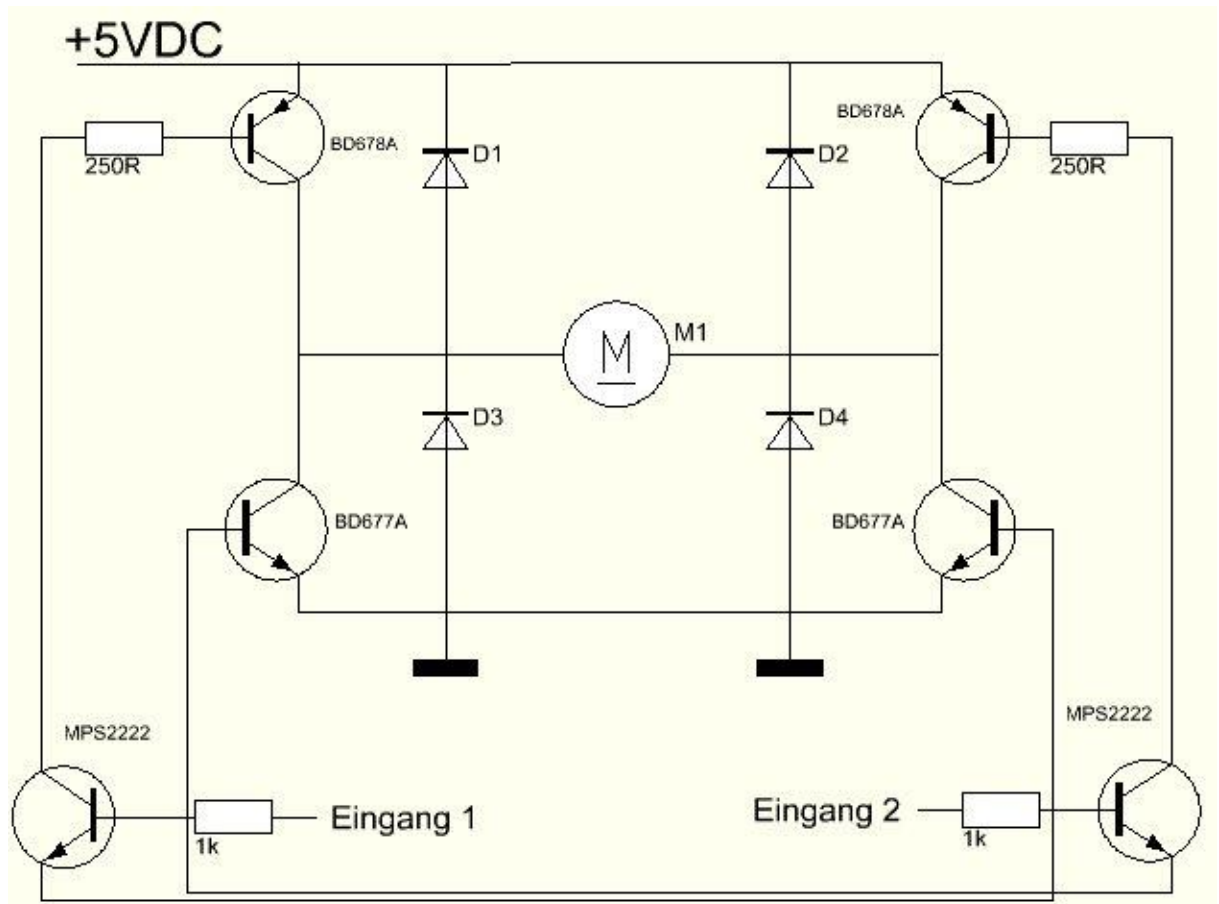


Abb. 5 Die H-Brücke zur Änderung der Drehrichtung von Gleichstrommotoren

Hier wird jeweils auf einen der Eingänge eine genügend hohe Spannung (z.B. +9V) gegeben, während der andere Eingang auf Masse gelegt wird. Wie man leicht sehen kann, werden dann jeweils zwei Leistungstransistoren in der diagonalen Lage leitend, während zwei andere sperren. Und so fließt durch den Motor der Strom entweder von links nach rechts, oder aber umgekehrt, was auch eine entgegengesetzte Drehrichtung bewirkt. Die Schaltung funktioniert tatsächlich recht gut; mehr noch, sie funktioniert sogar, wenn man an sie die PWM-Spannung legt. Bei größeren Leistungen ist es vorteilhaft, MOSFETs statt bipolarer Transistoren zu verwenden, um den Steuerstrom einzusparen. Zur Zeit werden sehr effektive H-Brücken von einigen Firmen in Form von integrierten Schaltungen produziert, von der Größe etwa 3x3mm. Ich bin gerade bei Versuchen mit solchen H-Brücken von Fa. Zetex und von Texas Instruments.

Fazit: Die Umkehrung der Drehrichtung von Gleichstrommotoren lässt sich leicht realisieren, dabei ist immer noch zusätzlich die Regulierung der Drehgeschwindigkeit (über PWM) möglich.

4 Vorläufige Zusammenfassung

Aus den obigen Betrachtungen folgen spezifische Realisierungsmöglichkeiten des Getriebe-Äquivalentes für den Antrieb mit Gleichstrommotoren. Es wurde gezeigt, dass schon mit relativ einfachen elektronischen Bauteilen die wesentlichen Ziele der Anpassung eines Motors an die Betriebsbedingungen (z.B. hinsichtlich der Leistung, Drehrichtung und –geschwindigkeit) erreicht werden können. Allerdings entstehen dabei auch Probleme besonderer Art, die geeignete Lösungsansätze erfordern.

Die Grundsätze, die in dieser Arbeit angesprochen wurden, sind auch schon in fertigen integrierten Schaltungen verkörpert, die die Ansteuerung von Gleichstrommotoren auf eine effektive Weise ermöglichen, indem sie über die Rückkopplung automatisch die Betriebsparameter einregeln. Es ist zu erwarten, dass dieser Bereich in Zukunft weiterhin intensiv entwickelt wird, wobei allerdings auch neuartige Elektromotoren (z.B. bürstenlose, extra leichte usw. usw.) ganz neue Möglichkeiten auf diesem Gebiet versprechen.

Allerdings ist auch zu erwarten, dass die Verwendung von neuartigen Materialien wie leichte und beanspruchbare Kohlenstofffaser (Karosserie), Nanophosphat-Elektroden (Akkus), leichte Aluminium-Verdrahtung der Elektromotoren usw. usw. ihrerseits die Effektivität des E-Mobils in besonderem Maße steigern wird.

5 Literatur

1. "Aufladen und durchstarten" (MBM) 'Aktiv' 10.Oktober 2009 Seite 8
2. BlueEFFICIENCY- Sonderveröffentlichung von Mercedes-Benz. In: Zeit Nr. 48, 29. Nov. 2009, S. 27.
3. <http://www.agenda21-treffpunkt.de/archiv/08/daten/ZEIT-28-Elektroauto.htm>
4. Detleff Rosner, Darf's ein bisschen mehr sein? In: ElektroModell (Fachzeitschrift für den Elektroflug), 01 / 2008, S. 26ff.
5. <http://www.auto.de/magazin/showArticle/article/30292/Mitsubishi-liefert-die-ersten-i-MiEV-nach-Europa>
6. Myke Predko, 123 Robotics Experiments for the Evil Genius, McGraw-Hill, 2006, p.146-148.
7. Werner von Siemens, Lebenserinnerungen. Prestel Verlag München, 1956. S. 250.
8. <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/23384/STMICROELECTRONICS/NE555.html>: 22.12.2008, Datasheet NE555 - GENERAL PURPOSE SINGLE BIPOLAR TIMERS - STMicroelectronics (p.4-5, Free-running multivibrator)
9. <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/44960/SIEMENS/BUZ21.html>: 22.12.2008, Datasheet BUZ21 - SIPMOS Power Transistor (N channel Enhancement mode Avalanche-rated) –Siemens Semiconductor Group
10. Vgl. [6], p.152-153.

6 Danksagungen

Der Fa. Merck sei für die finanzielle Unterstützung dieses Vorhabens herzlich gedankt. Herrn Dr. Trefz danke ich für interessante Anregungen.